



Sveučilište u Zagrebu  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
Kemijski odsjek

Antonia Volmut

Studentica 3. godine Preddiplomskog sveučilišnog studija KEMIJA

**ČESTIČNI CRTEŽ U SVEUČILIŠNIM  
UDŽBENICIMA IZ KEMIJE**

**Završni rad**

Rad je izrađen u Zavodu za opću i anorgansku kemiju

Mentor rada: izv. prof. dr. sc. Draginja Mrvoš-Sermek

Zagreb, 2019. godina.



Datum predaje prve verzije Završnog rada:

05. srpnja 2019.

Datum ocjenjivanja Završnog rada i polaganja Završnog ispita:

20. rujna 2019.

Mentor rada: izv. prof. dr. sc. Draginja Mrvoš-Sermek

Potpis:



# Sadržaj

§ SAŽETAK.....	VII
§ 1. UVOD.....	9
1.1. Koncept.....	11
1.2. Pogrešna shvaćanja.....	12
1.3. Umni modeli.....	13
1.4. Čestični crtež i tri razine poučavanja kemije .....	14
§ 2. PRIKAZ ODABRANE TEME .....	17
2.1. Vrste tvari .....	17
2.2. Fizikalne i kemijske promjene .....	18
2.3. Jednadžba kemijske reakcije .....	21
2.4. Brzina kemijske reakcije, kemijska ravnoteža.....	23
2.5. Otopine soli, kiselina i baza .....	26
2.6. Redoks reakcije, elektrokemijski članci.....	30
2.7. Termokemija .....	33
2.8. Koligativna svojstva .....	35
2.9. Čestični crtež, prednosti i nedostaci.....	37
§ 3. LITERATURNI IZVORI.....	39



## § Sažetak

Tema ovog Završnog rada je odabir i analiza obrade nekih temeljnih pojmova u sveučilišnim udžbenicima iz kemije koji poučavaju pojam na sve tri razine, makroskopskoj, atomsko-molekularskoj i simboličkoj i pri tome uključuju čestični crtež. Glavni cilj u poučavanju kemije trebao bi biti konceptualno razumijevanje kemijskih pojmova što se postiže samo ako se sve tri razine međusobno nadopunjuju. Konceptualno razumijevanje u kemiji obuhvaća tri vrste znanja: deklarativno znanje (poznavanje činjenica), procesno znanje (obuhvaća pravila, algoritme i koncepte) i uvjetna znanja (odabir i uporaba određene informacije u danoj problemskoj situaciji).

Poučavanje kemije kroz analizirani udžbenički materijal najviše se odvija na simboličkoj razini, iako ona ne omogućava kvalitetno i cjelovito objašnjavanje kemijskih procesa te konceptualno razumijevanje kemijskih pojmova. Simbolička razina je prikaz stvarnosti. Uporaba simbola omogućava kemičarima jednostavnu i praktičnu komunikaciju ponajprije putem simbola kemijskih elemenata, kemijskih formula i jednadžbi kemijskih reakcija, a potom i grafičkih prikaza, različitih modela i sl. Udio makroskopske razine koja je dostupna izravnom osjetilnom opažanju u obrazloženju pojmova opada s porastom njihove kognitivne zahtjevnosti.

Atomsko-molekularska razina opisa kemijskih pojmova u kojoj čestični crtež igra značajnu ulogu zastupljenija je u novijim udžbeničkim izdanjima. Čestični crteži su dvodimenzionalni, statični modeli koji pomoću različitih simbola vizualiziraju submikroskopsku razinu promjene. To su ujedno metodički oblikovani specifični kemijski prikazi koji se koriste za unaprjeđenje poučavanja i evaluaciju znanja. Uporaba čestičnog crteža je jedan od načina kojim se studentima može vizualizirati kemijska promjena i povezati makroskopska i simbolička razina koncepta. Mnoga istraživanja koriste čestični crtež kao alat u otkrivanju studentskih pogrešnih shvaćanja ali i njihova uklanjanja. Autori udžbenika koji koriste čestični crtež moraju voditi računa o cijelom konceptu u koji je uključen obrađivani pojam i odlučiti koliko će razina koncepta pokazati. Čestični crtež ima svoja ograničenja i u peru nevješta autora može biti izvor pogršnih shvaćanja. U radu su izdvojeni primjeri dobre udžbeničke prakse vezani uz teme: vrste tvari, fizikalne i kemijske promjene, jednadžba kemijske reakcije, brzina kemijske reakcije, kemijska ravnoteža; otopine soli, kiselina i baza; redoks reakcije i elektrokemijski članci, termokemija i koligativna svojstva.

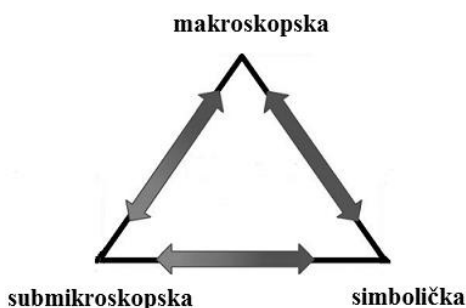




## § 1. UVOD

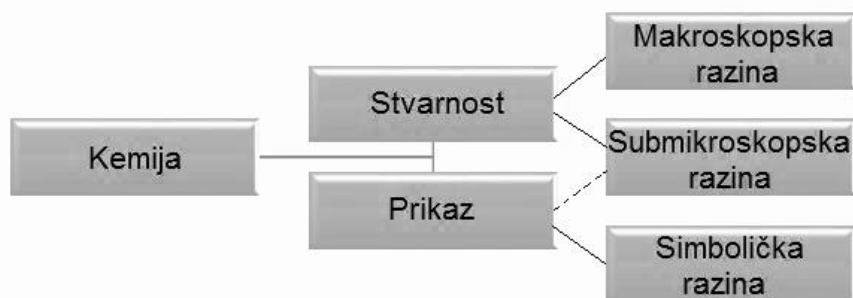
Temeljni kemijski koncept je koncept tvari. Kemija je prirodna znanost koja proučava tvari od kojih je građen svemir, ispituje njihov sastav, svojstva i građu.

Suvremeno poučavanje kemije odvija se na tri jednako važne razine: makroskopskoj, submikroskopskoj (čestičnoj) i simboličkoj. Ovaj kemijski triplet (slika 1.) predstavlja teorijski okvir istraživanja u kemijskom obrazovanju i temeljnu ideju u stvaranju predmetnih kurikuluma i pisanju udžbenika.<sup>1,2</sup>



Slika 1. Johnstonov trokut-razine poučavanja kemije (preuzeto i prilagođeno prema ref. 1)

*Makroskopska razina* obuhvaća osjetilna, makroskopska svojstva tvari pa većina učenika /studenata na ovoj razini iskustvenim učenjem kroz pokuse, analizom opažanja i dobivenih rezultata uspješno usvaja i razlikuje temeljne kemijske pojmove. Potom se na *submikroskopskoj razini*, uporabom čestičnog modela, objašnjavaju opažene pojave. Na ovoj razini čestični model pomaže u vizualizaciji apstraktnih pojmova atoma, molekula i iona te njihovih međudjelovanja. Uporaba *simbola* omogućava kemičarima jednostavnu i praktičnu komunikaciju ponajprije putem simbola kemijskih elemenata, kemijskih formula i jednadžbi kemijskih reakcija, a potom i grafičkih prikaza, različitih modela, matematičkih formalizama, kompjutorskih animacija, shema i sl.<sup>3</sup> Makroskopska razina je stvarna, dostupna izravnom osjetilnom opažanju. Simbolička razina je prikaz stvarnosti. Submikroskopska razina temelji se na stvarnim opažanjima, ali nužno zahtijeva korištenje zakonitosti i teorija kojima se objašnjavaju promjene na čestičnoj razini te povezuje stvarnost i prikaz (slika 2.).<sup>4,5</sup>



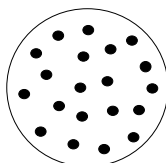
Slika 2. Odnosi među razinama poučavanja (preuzeto i prilagođeno prema ref. 4)

Glavni cilj u poučavanju kemije trebao bi biti konceptualno razumijevanje kemijskih pojmova, što se postiže samo ukoliko se sve tri razine međusobno nadopunjuju.<sup>6,7,8</sup> Usvajanje kemijskih koncepata za sve koji su uključeni u taj proces (studente, nastavnike i autore udžbenika) zahtijevan je zadatak. Konceptualno razumijevanje u kemiji obuhvaća tri vrste znanja: *deklarativno znanje* (poznavanje činjenica), *procesno znanje* (obuhvaća pravila, algoritme i koncepte) i *uvjetna znanja* (odabir i uporaba određene informacije u danoj problemskoj situaciji).<sup>4</sup> Mnoga istraživanja pokazuju da studenti imaju značajne poteškoće u razumijevanju temeljnih kemijskih pojmova. Poučavanje kemije najčešće se odvija na simboličkoj razini, iako ona ne omogućava kvalitetno i cjelovito objašnjavanje kemijskih promjena te konceptualno razumijevanje kemijskih pojmova. U posljednjih 30-ak godina istraživanja učestalo ukazuju da se studenti kemije snalaze u rješavanju zadataka predstavljenih na simboličkoj razini koji od njih zahtijevaju algoritamski pristup. Međutim, problem nastaje u zadacima koji zahtijevaju razumijevanje submikroskopske razine unatoč deklarativnom znanju o pojavama i stanjima. Na slici 3. primjer je jednog takvog ispitnog zadatka korištenog u mnogim istraživanjima.<sup>9,10</sup>

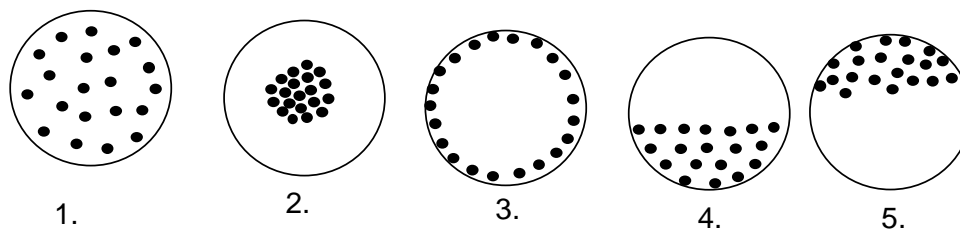
1. 0,100 mol vodika zauzima volumen od 600 mL pri 25 °C i tlaku 4,08 bara. Ako volumen ostaje stalan, koliki je tlak uzorka plina pri –5 °C?

A. 4054 bar    **B. 3,67 bar**    C. 6,00 bar    D. 2,98 bar    E. 4,08 bar

2. Slika predstavlja poprečni presjek čeličnog spremnika punjenog vodikom pri 20 °C i tlaku 3 bara. Točkice simboliziraju raspodjelu molekula vodika.



Koji od sljedećih crteža prikazuje raspodjelu molekula vodika u čeličnom spremniku ako se temperatura snizi na  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? Vrelište vodika je pri  $-252,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  a talište pri  $-259,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Obrazložite svoj odgovor.

Slika 3. Primjer ispitnog zadatka koji propituje pojam na simboličkoj i submikroskopskoj razini. (preuzeto i prilagođeno prema ref. 9)

Studenti su u prvom dijelu zadatka uspješni ( $\sim 90\%$ ) dok drugi dio zadatka rješava svega oko  $1/3$  ispitanika, bez obzira na zemlju u kojoj je istraživanje provedeno i početno formalno kemijsko obrazovanje studenata. Vježbom studenti mogu naučiti određene algoritme koje koriste pri rješavanju zadataka, a da pritom ne razumiju kemijske sadržaje na koje se oni odnose. *Zašto je to tako ako su poznate dobre paradigme poučavanja koje slijedi značajan broj novijih kemijskih udžbenika po kojima uče studenti diljem svijeta?*

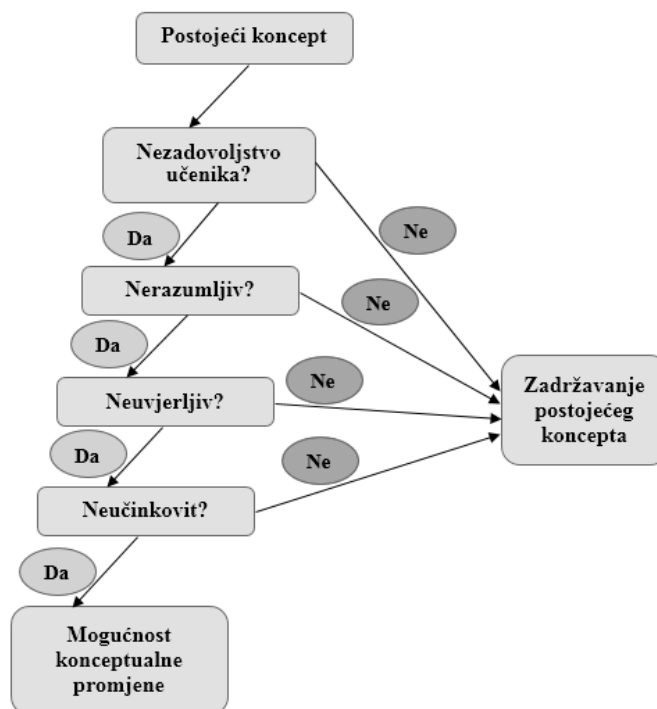
## 1.1. Koncept

Prilikom upoznavanja svijeta oko sebe u mozgu se stvaraju umne slike ili predodžbe materijalne stvarnosti.<sup>11</sup> Upoznajemo svoju okolinu tako da ispitujemo novi predmet uspoređujući ga s već stvorenim predodžbama. Svako poučavanje se temelji na već usvojenom znanju, jer svatko ima svoju sliku svijeta, svoja iskustva i pretkoncepte koje su stečene kroz život. Obradom novih pojava koncepti se razvijaju i dobivaju još neka nova značenja. Svaka nova informacija se nadopunjuje i produbljuje. Međutim, iskustva koja se ne uklapaju u postojeći okvir zahtijevaju pronalaženje smisla i značenja novih iskustava. Koncept označava ideju ili predodžbu koja nastaje na temelju sklopa informacija o nekoj pojavi u realnom ili u apstraktnom svijetu.<sup>12</sup> Svaki pojedinac pronalazi svoje putove oblikovanja koncepta, na koje utječu i emocionalni, socijalni i kulturni čimbenici. Većina studenata na nastavu dolazi s nizom pretkoncepta koje mogu značajno ograničavati razumijevanje novih pojmova u nastavi. Razlikuju se dvije vrste koncepata: primarni i sekundarni.<sup>13</sup> Primarni koncepti su koncepti u nekoj logičkoj shemi.

Sekundarni koncepti se razvijaju uz poznate primarne koncepte, uz uvjet da sekundarni koncept ne može biti formiran ako prije nisu formirani svi koncepti potrebni za njegovu apstrakciju. Pojam atom može se shvatiti kao primarni koncept. Kako bi se došlo do sekundarnog koncepta kemijskog spoja, osim pojma atoma mora biti formiran i pojam kemijskog elementa, molekule i iona. Treba voditi računa bilo tijekom nastave, bilo tijekom pisanja udžbeničkih materijala o tom imaju li studenti ispravno formirane sve koncepte koji se pojavljuju u novoj definiciji. Ako student razumije temeljni koncept bit će sposoban primijeniti ga na nove koncepte, ali to često nije slučaj.

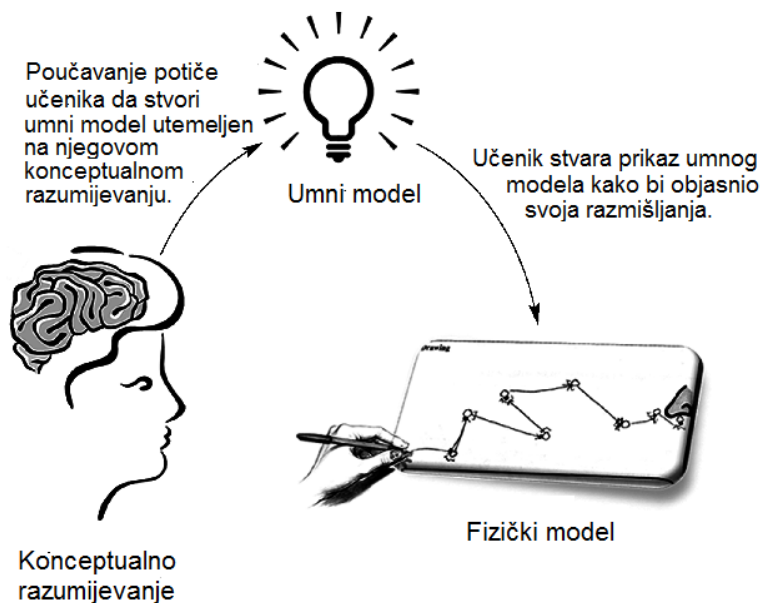
## 1.2. Pogrešna shvaćanja

Pri provjeri usvojenosti pojedinih pojmova/konceptata moguće je različitim instrumentima otkriti je li ona u skladu sa znanstvenim spoznajama, odnosno postoje li pogrešna shvaćanja. Pogrešna shvaćanja mogu se opisati kao pogrešne predodžbe, ideje ili zamisli. Pogrešna shvaćanja nastaju tijekom učenja kao mješavina kemijskih i intuitivnih ideja proizašlih iz potreba objašnjavanja kemijskih konceptata i situacija iz svakodnevnog života. Pogrešna shvaćanja mogu nastati kao rezultat automatske obrade jezične strukture bez korekcije smisla. Neka pogrešna shvaćanja proizlaze iz teorija koje su u znanosti prevladane. Kada se od studenta zahtijeva obrazloženje odabranog odgovora, unatoč točno odabranom odgovoru, moguće je uočiti postojanje pogrešnog shvaćanja. Nastavnik i autori udžbenika moraju steći spoznaje o važnosti konceptualnog razumijevanja i prepoznati/poznavati uobičajena pogrešna shvaćanja. Nakon utvrđivanja pogrešnih shvaćanja, važno je razviti strategije njihovog uklanjanja. Konceptualna promjena je moguća ako su zadovoljena četiri uvjeta (slika 4.). Prvi od uvjeta je nezadovoljstvo učenika s postojećim konceptom. Novi koncept mora biti razumljiv, prilagođen već naučenim konceptima i učinkovitiji od starog.<sup>14,15</sup>

Slika 4. Model konceptualne promjene<sup>4</sup>

### 1.3. Umni modeli

Umni model je oblik umne slike koja predstavlja osobnu umnu konstrukciju.<sup>16</sup> Znanstveni modeli su dogovorni modeli koji se koriste u području znanosti kako bi postavili hipotezu, objasnili makroskopske pojave i procijenili rezultate znanstvenih istraživanja. Umni modeli koji se odnose na objekte kao što su knjige i sl. nazivaju se fizički umni modeli. Umne prikaze koncepata i apstraktnih modela na primjeru fizičke i kemijske promjene nazivamo konceptualnim umnim modelima. Umno modeliranje može se poistovjetiti s procesom učenja, dok su umni modeli u tom procesu proizvodi učenja (slika 5.). Rezultati dobiveni analizom fizičkih modela studenata kao prikaza umnog modela mogu poslužiti u unaprjeđenju nastavne prakse i udžbeničke literature, jer su odličan alat i instrument u otkrivanju pogrešnih studentskih shvaćanja.<sup>17,18</sup>



Slika 5. Prikaz odnosa konceptualnog razumijevanja, umnog modela i fizičkog modela.

(preuzeto i prilagođeno prema ref. 18)

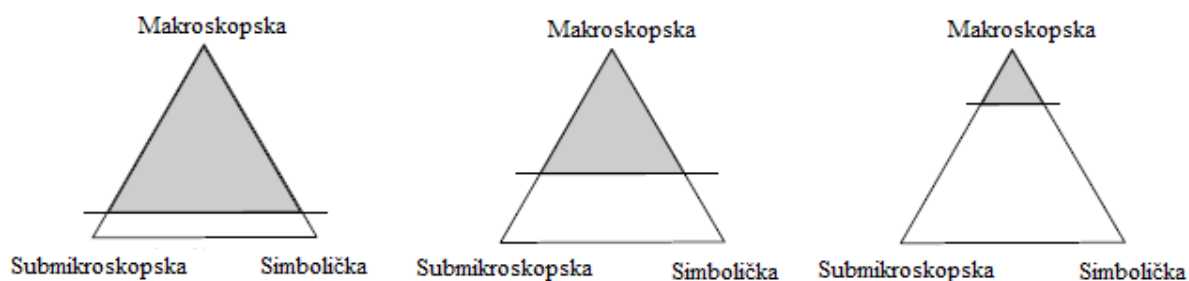
Koristeći čestični crtež u poučavanju studenata neki autori opisuju kao pristup koji doprinosi boljem razumijevanju sadržaja i uklanjanju pogrešnih shvaćanja.<sup>19</sup>

#### 1.4. Čestični crtež i tri razine poučavanja kemije

Tema ovog Završnog rada je odabir i analiza obrade nekih temeljnih pojmova u sveučilišnim udžbenicima iz kemije koji poučavaju pojam na sve tri razine, makroskopskoj, atomsko-molekularskoj i simboličkoj i pri tome uključuju čestični crtež. Uz već navedeno u uvodu pri ovakvom udžbeničkom konceptu valja voditi računa o obrazovnom uzrastu i razvijenosti kognitivnih sposobnosti, te sukladno tome složenosti čestičnog crteža. Čestični crteži su dvodimenzionalni, statični modeli koji pomoću različitih simbola vizualiziraju čestičnu razinu. To su ujedno metodički oblikovani specifični kemijski prikazi koji se koriste za unaprjeđenje poučavanja i evaluacije znanja.<sup>20</sup>

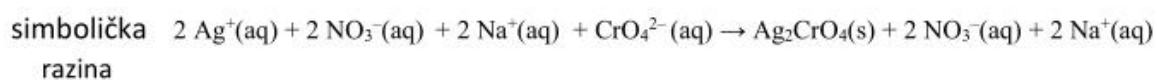
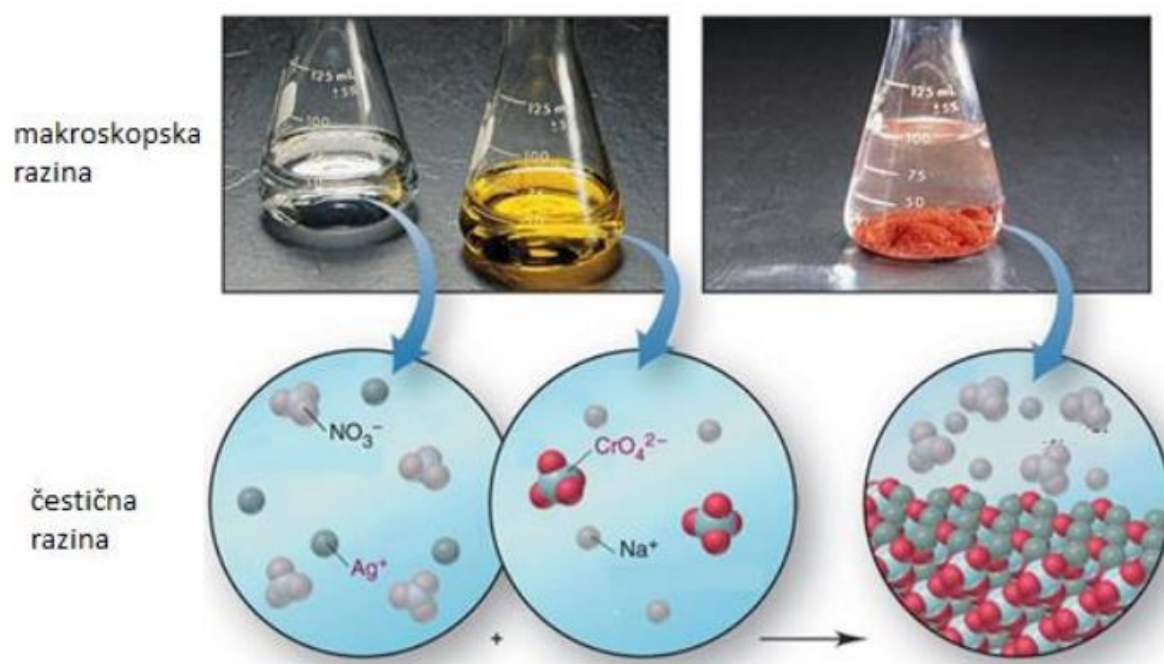
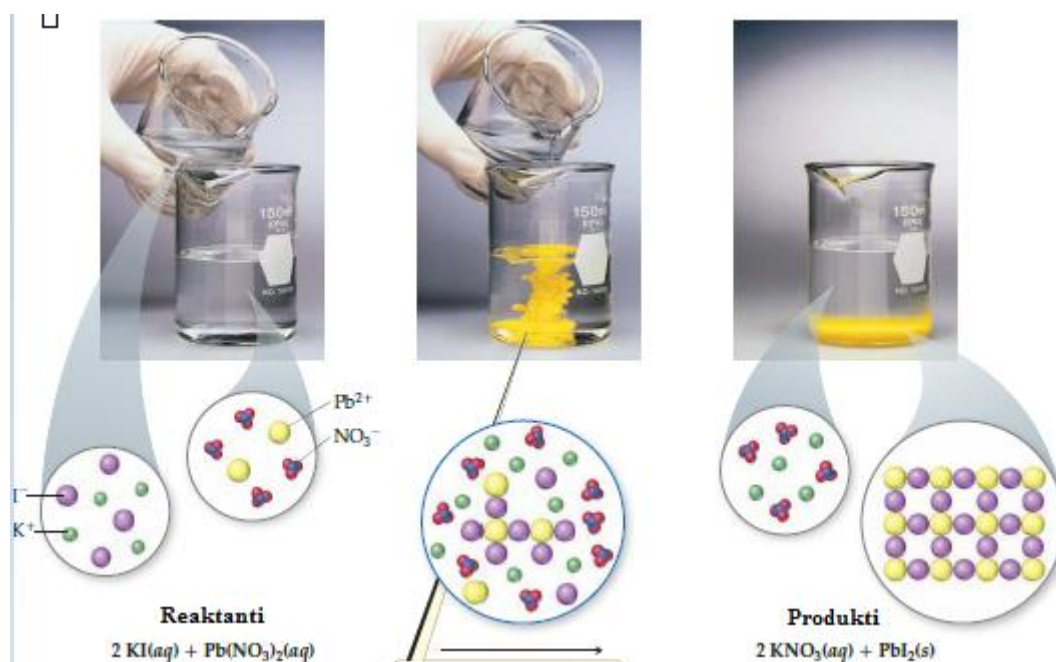
Za ostvarenje postavljenog cilja u ovom radu potrebno je poznavati i model nastave opisan slikom 6. Pri početnom poučavanju kemije makroskopska razina je ključna a prerano uvođenje submikroskopske i simboličke razine često uzrokuje negativan stava prema kemiji kod mlađih učenika. Autori udžbenika i kurikuluma kemije za taj uzrast trebali bi razmotriti

potrebu za proširivanjem kemijskih sadržaja koji se odnose na makroskopsku razinu. U skladu s tim predložen je takozvani „*triciklički model nastave*“, prema kojemu se tri razine nastavnih sadržaja izučavaju kroz tri obrazovna ciklusa. U prvom, makro-ciklusu prevladava poučavanje na makroskopskoj razini. Ključnu ulogu imaju kemijski pokusi tijekom kojih učenici upoznaju tvari i njihova svojstva. Udio simboličke i submikroskopske razine raste u drugom i trećem ciklusu sukladno razvoju kognitivnih sposobnosti učenika/studenata, ali makroskopska razina i dalje s njima čini 'kemijski triplet'. Za ovakav model nastave je predložen naziv „*rastući ledeni brijeg*“ (slika 6).<sup>21,22,5</sup>



Slika 6. *Rastući ledeni brijeg*, udio pojedine razine poučavanja kemijskih sadržaja tijekom primarnog, sekundarnog i tercijarnog obrazovnog ciklusa (preuzeto i prilagođeno prema ref. 5)

Na temelju svega navedenog, ciljani odabir u pregledu udžbenika ima uzor u ovdje izdvojenim primjerima opisa taložne reakcije u dva sveučilišna udžbenika (slika 7 i 8).<sup>23,24</sup> Pregledom je ustanovljeno da autori ovaj pristup ne koriste s jednakom zastupljenošću za sve kemijske pojmove što je i razumljivo zbog ograničenja čestičnog prikaza i apstraktnosti dijela pojmova, gdje čestični crtež nije pogodan alat vizualizacije stanja sustava i promjena u njemu. Slijedom navedenog u ovom radu odabrani su pojmovi vezani uz teme: *vrste tvari, fizikalne i kemijske promjene, jednadžba kemijske reakcije, brzina kemijske reakcije, kemijska ravnoteža; otopine soli, kiselina i baza; redoks reakcije i elektrokemijski članci, termokemija i koligativna svojstva*.

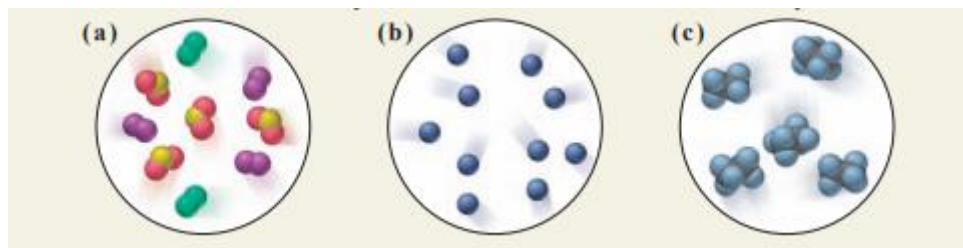
Slika 7. Prikaz taloženja srebrova(I) kromata.<sup>23</sup>Slika 8. Prikaz taloženja olovova(II) jodida.<sup>24</sup>



## § 2. PRIKAZ ODABRANE TEME

### 2.1. Vrste tvari

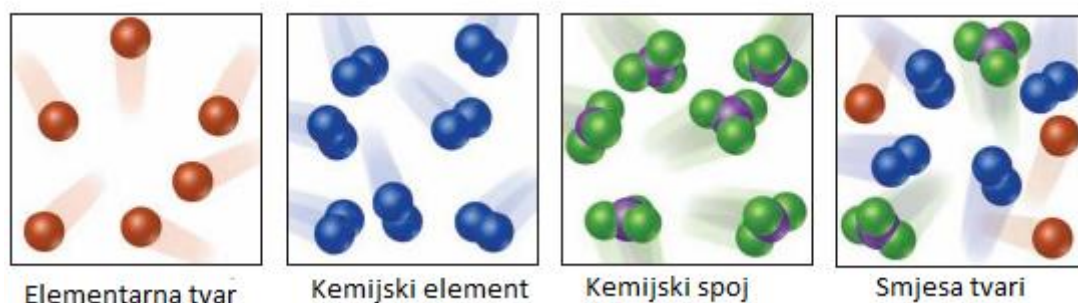
Jedna od prvih tema koja se može prikazati pomoću čestičnog crteža je podjela vrsta tvari na elementarne tvari, kemijske spojeve i smjese tvari (homogena i heterogena).



Slika 9. Čestični prikaz vrsta tvari. Slika prikazuje: (a) smjesu tvari, (b) elementarnu tvar i (c) kemijski spoj.<sup>23</sup>

Slika 9. prikazuje čestične crteže prethodno navedenih triju vrsta tvari. Modeli atoma pojedinih vrsta čestica prikazani su različitim bojama. Čestični crtež pod (a) prikazuje smjesu tvari. U njoj razlikujemo tri različita tipa modela molekula, dvije elementarne tvari i jednog kemijskog spoja. Čestični prikaz pod (b) se sastoji od atoma jedne vrste i predstavlja elementarnu tvar, dok crtež pod (c) predstavlja samo jednu vrstu molekula građenu od dvije vrste atoma i predstavlja kemijski spoj.

Stains i Talanquer istraživali su među studentima na različitim razinama sveučilišnog obrazovanja jačinu umne povezanosti između pojma molekule elementarne tvari i molekule kemijskog spoja.<sup>2,18</sup> Veliki broj studenata svrstava molekule elementarnih tvari među kemijske spojeve. To je pokazatelj snažne umne povezanosti koncepata molekule i kemijskog spoja. Zabrinjavajuća je činjenica da su studenti s viših godina ostvarili lošije rezultate u odnosu na studente početnike što govori da umna povezanost ovih koncepata vremenom nije postala slabija već je neočekivano rasla.<sup>25</sup> Stoga čestični prikazi sa slike 9 i 10, imaju svoje opravdano mjesto u sveučilišnim udžbenicima. U oba crteža statičnost prikaza prevladana je sjenom traga gibanja jedinki.

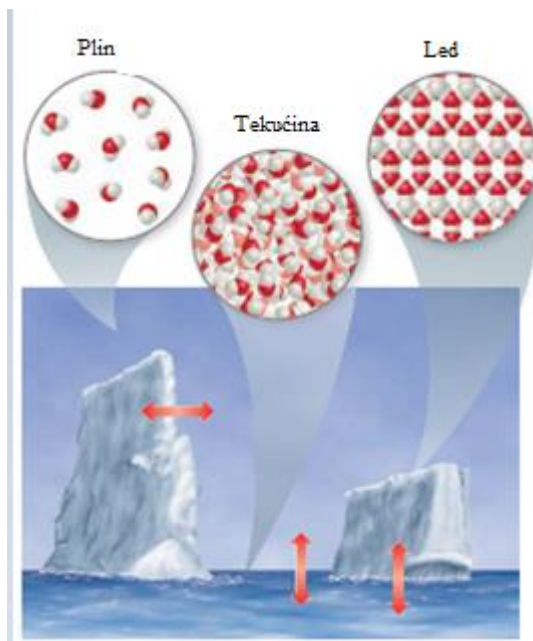


Slika 10. Čestični prikaz različitih vrsta tvari (preuzeto i prilagođeno prema ref. 24)

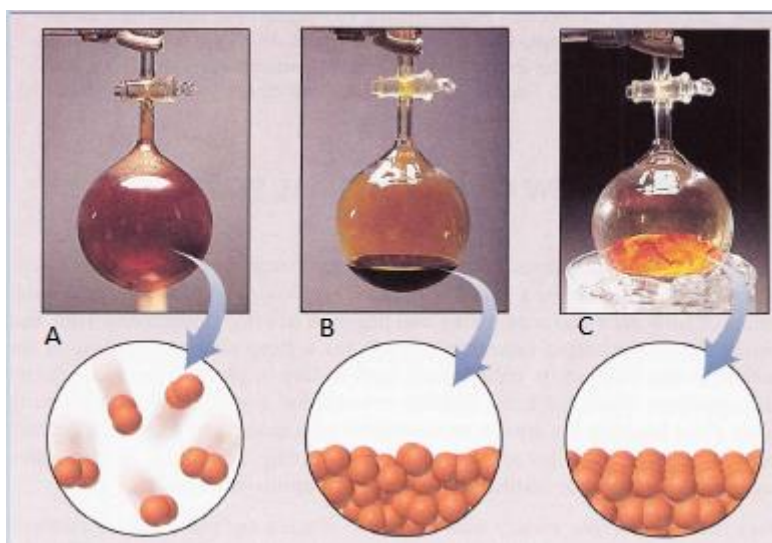
## 2.2. Fizikalne i kemijske promjene

Promjene pri kojima se ne mijenja kemijski sastav tvari već samo oblik, veličina, agregacijsko stanje i sl. naziva se fizikalnom promjenom. Agregacijsko stanje tvari ovisi o vrsti tvari i o vanjskim uvjetima: temperaturi i tlaku. Čvrsto stanje je stanje stalnog oblika i volumena. Tekuće stanje je stanje stalnog volumena, proprima oblik posude u kojoj se nalaze. Plinovito stanje je stanje promjenjivog volumena i oblika. Agregacijska stanja se razlikuju prema uređenosti atoma odnosno molekula. Plinovito stanje odlikuje odsutnost bilo kakva reda dok kod čvrstog stanja postoji uređenost duga dosega. Tekućine predstavljaju stanje između plinovitog i čvrstog, uređenost je ograničena dosega. Većina tvari se, ovisno o uvjetima, može pojavljivati u svim trima stanjima. Navedeno se može nazvati deklarativnom vrstom znanja i ne daje sigurnost da je ono dostatno za rješavanje zadatka sa slike 3.

Stoga je za pozdraviti učestalost prikaza poput onih na slici 11 i 12 koji se susreću kako u novim, tako i u starijim izdanjima udžbenika, ali s različitom kvalitetom čestičnog dijela prikaza. Često su kod čestičnog prikaza tekućeg agregacijskog stanja zanemarena međučestična djelovanja i sile pa crteži upućuju na odsutnost uređenosti ograničenog dosega.

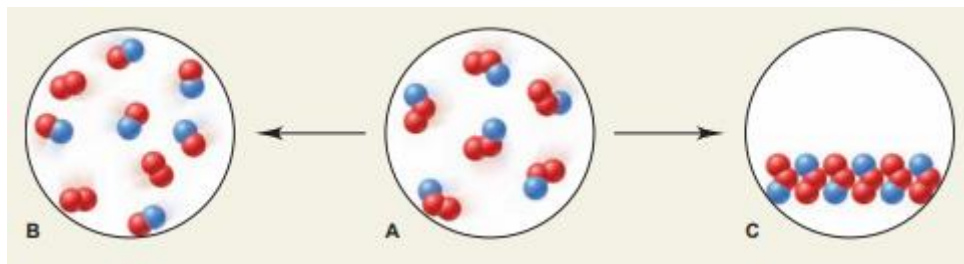


Slika 11. Čestični prikaz agregacijskih stanja vode (preuzeto i prilagođeno prema ref. 24)

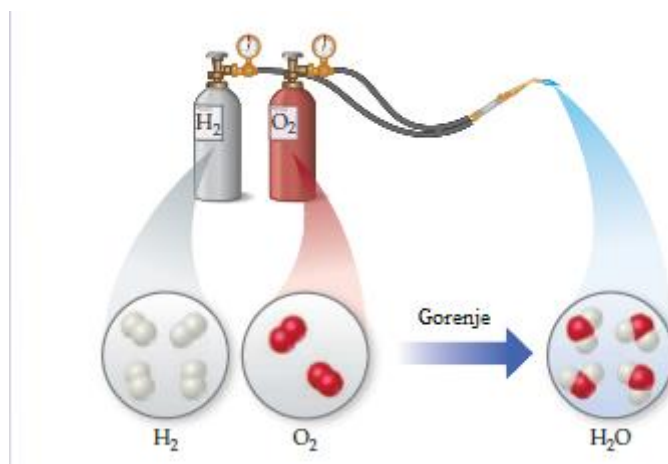


Slika 12. Čestični prikaz agregacijskih stanja broma ( $\text{Br}_2$ ). Slika prikazuje: A) plinovito stanje, B) tekuće stanje i C) čvrsto stanje (preuzeto i prilagođeno prema ref. 23)

Promjene u kojima iz jedne ili više tvari nastaju nove tvari ili se složene tvari rastvaljaju na jednostavnije nazivamo kemijskim promjenama. Pri kemijskoj promjeni istodobno se mogu događati i fizikalne promjene jer novonastale tvari imaju različita fizikalna svojstva.

Slika 13. Čestični prikaz fizikalnih i kemijskih promjena.<sup>23</sup>

Slika 13. prikazuje čestični crtež uzorka tvari A, koja prolazi kroz dvije različite promjene, B i C. S obzirom na prikaze promjena potrebno je odrediti koja od navedenih predstavlja fizikalnu, a koja kemijsku promjenu. Broj i boja modela atoma koji čine svaku česticu govore o sastavu tvari. U uzorku A svaka se čestica (molekula kemijskog spoja) sastoji od jedne plave i dvije crvene jedinice. Uzorak s česticama istog sastava kao i tvar A, ali različitog oblika međučestičnog udruživanja predstavlja fizikalnu promjenu (prikaz C), a uzorak s česticama različitog sastava od A prikazuju kemijsku promjenu (prikaz B je smjesa jedne elementarne tvari i jednog kemijskog spoja).



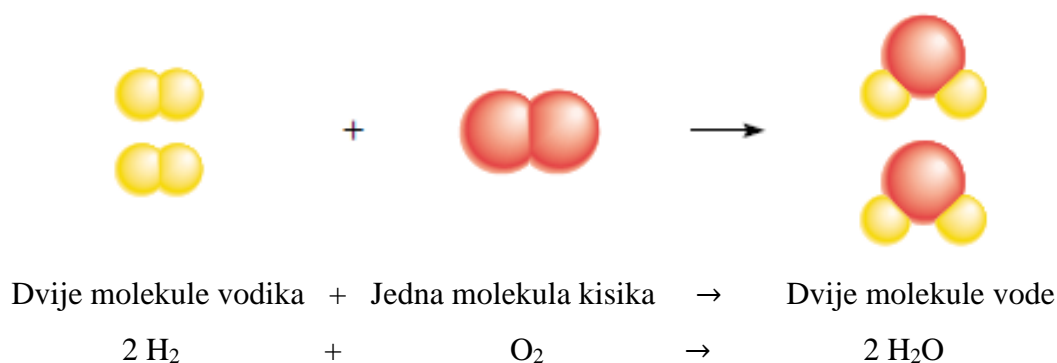
Slika 14. Čestični prikaz kemijske promjene. (preuzeto i prilagođeno prema ref. 24)

Čest prikaz kemijske promjene je gorenje ili izgaranje. Dolazi do oksidacije gorivih sastojaka nekog goriva uz stvaranje različitih reakcijskih produkata. Gorenje nastupa tek kada se goriva tvar zagrije do neke, za nju karakteristične temperature.

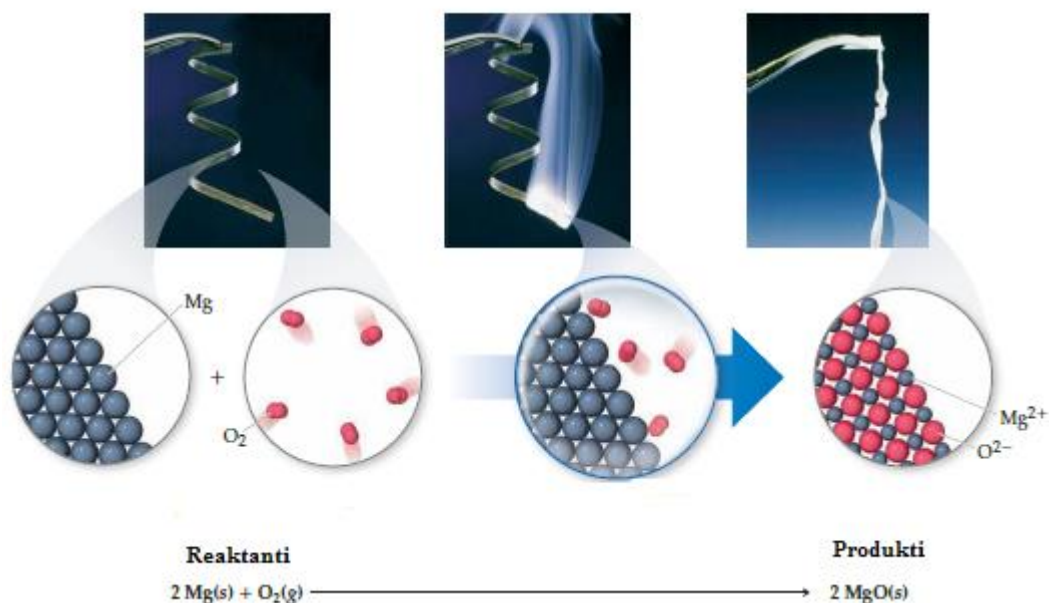
### 2.3. Jednadžba kemijske reakcije

Jednadžba kemijske reakcije prikazuje jediničnu pretvorbu, opisuje promjenu pretvorbe reaktanata u produkt(e). Koristimo ju za prikazivanje kemijskih reakcija uz pomoć kemijskih simbola i formula. Kelly i suradnici naglašavaju da jednadžba kemijske reakcije prikazuje događaje s makroskopske i submikroskopske razine te je korisna u kvalitativnom i kvantitativnom opisu. Kvalitativnim praćenjem kemijske promjene utvrđuje se koje su tvari sudjelovale u reakciji. Kvantitativnim praćenjem kemijske reakcije utvrđuje se množina, odnosno masa tvari koje su sudjelovale u reakciji kemijske promjene pri čemu sažima promjenu ne prikazujući reaktante i produkte na čestičnoj razini.<sup>26</sup> Jednadžba kemijske reakcije ne prikazuje mehanizam reakcije, nego tvari koje su reagirale i one koje će nastati. Studenti često iako poznaju činjenice, procese i zakonitosti pisanja jednadžbe kemijske reakcije ne dovode u odnos s njom kemijske sadržaje na čestičnoj razini promjene.

Jednočestični prikaz (slika 15) predstavlja najmanji omjer čestica u kemijskoj reakciji u odnosu na višečestični prikaz (slika 16) koji sadrži veći broj čestica u određenom omjeru. Chang i Gilbert naglašavaju prednosti višečestičnog prikaza u odnosu na jednočestični. Čestični prikazi jednadžbi kemijskih reakcija u većini udžbenika su jednočestični i omogućavaju studentima bolje početno usvajanje pojma jednadžba kemijske reakcije, ali nisu pogodni za potpuno usvajanje koncepta (mjerodavni reaktant, reaktant u suvišku, doseg reakcije, čestični opis sastava reakcijske smjese i sl.).<sup>4</sup>

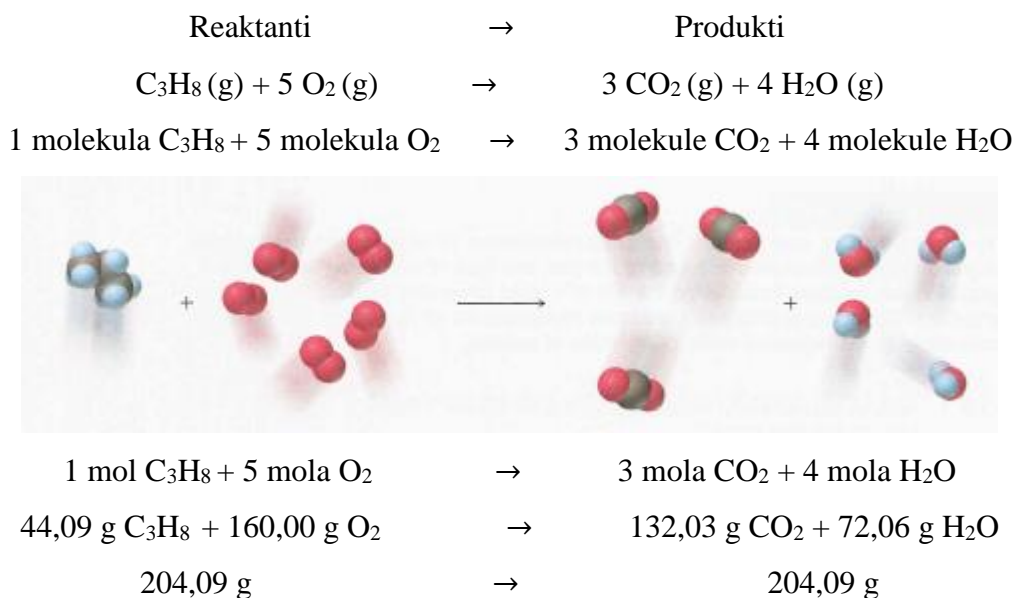


Slika 15. Jednadžba kemijske reakcije dobivanja vode. (preuzeto i prilagođeno prema ref.27)



Slika 16. Reakcija izgaranja metala magnezija u zraku. (preuzeto i prilagođeno prema ref. 23)

Čestični crtež na slici 17 prikazuje jediničnu promjenu uporabom tkz. jednočestičnog prikaza, ali popratni simbolički zapisi pomažu studentu razumijeti njeno kvalitativno i kvantitativno značenje.

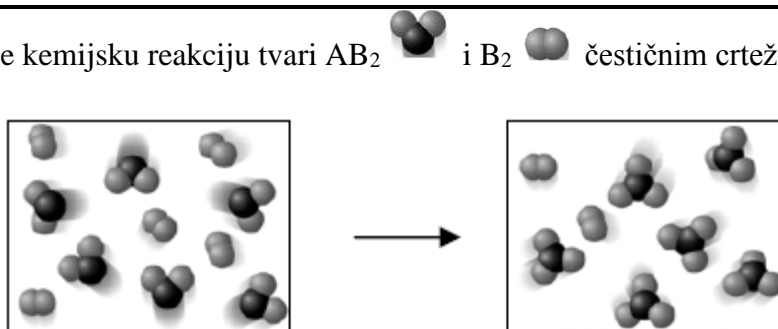


Slika 17. Prikaz jednadžbe kemijske reakcije gorenja propana. (preuzeto i prilagođeno prema ref. 23)

Davidowitz i suradnici predlažu zadatke koji zahtijevaju da se višestruki prikaz kemijske reakcije opiše jednadžbom kemijske reakcije. Simbolički prikaz omogućava jednostavnije rješavanje stehiometrijskih zadataka. Kako bi simbolički prikaz bio ispravan moraju se zadovoljiti određeni uvjeti kao što su zakon o očuvanju mase, stehiometrijski omjer reaktanata i produkata te mogućnost prepoznavanja mjerodavnog reaktanta.<sup>20</sup> Takvi zadatci danas se nalaze u mnogim udžbenicima.

---

Slika prikazuje kemijsku reakciju tvari  $AB_2$  i  $B_2$  čestičnim crtežom.



- (a) Napišite jednadžbu kemijske reakcije.
  - (b) Navedite tvar koja je mjerodavni reaktant u kemijskoj reakciji.
  - (c) Izračunajte množinu produkta ukoliko reagiraju 3 mol tvari  $AB_2$  i 5 mol tvari  $B_2$ .
  - (d) Izračunajte množinu reaktanta u suvišku u sustavu opisanome u zadatku (c).
- 

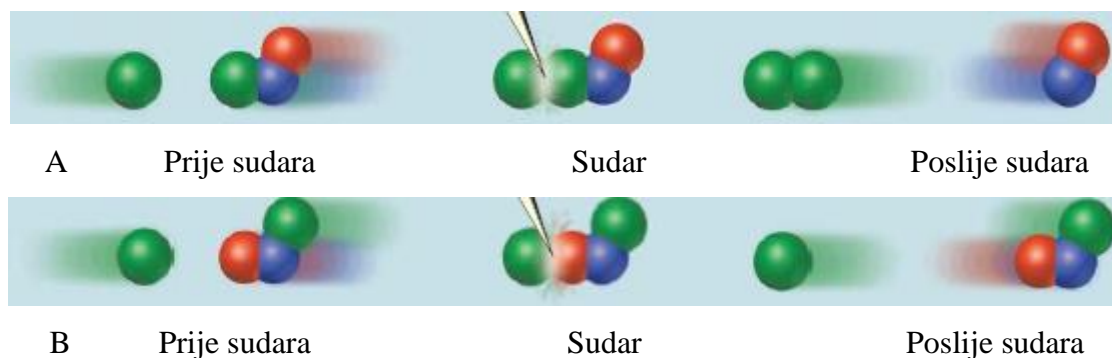
Slika 18. Čestični crtež za evaluaciju usvojenosti koncepta jednadžba kemijske reakcije (preuzeto i prilagođeno prema ref. 20)

## 2.4. Brzina kemijske reakcije, kemijska ravnoteža

Brzina kemijske reakcije opisuje napredovanje kemijske reakcije s vremenom, definira se pomoću omjera dosega reakcije i vremena tijekom kojeg je reakcija tekla. Brzina kemijske reakcije ovisi o temperaturi, tlaku, koncentraciji i katalizatoru. Švedski kemičar Svante Arrhenius 1888. godine predlaže tezu da reaktanti moraju imati minimalnu relativnu kinetičku energiju u trenutku sudara da bi došlo do reakcije. Prema modelu sudara, kinetička energija reaktanata u trenutku sudara pretvara se u potencijalnu energiju produkta. Nakon sudara, kinetička energija molekula može se iskoristiti za rastezanje, savijanje i na kraju pucanje veze, što dovodi do kemijskih reakcija. To jest, kinetička energija koristi se za promjenu potencijalne

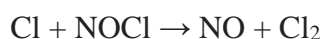


energije molekule. Minimalna energija potrebna za pokretanje kemijske reakcije naziva se energija aktivacije,  $E_a$ . Njezina vrijednost varira od reakcije do reakcije.



Slika 19. Čestični prikaz: A) učinkovit sudar, dolazi do kemijske reakcije, B) neučinkovit sudar, ne dolazi do kemijske reakcije (preuzeto i prilagođeno prema ref. 23)

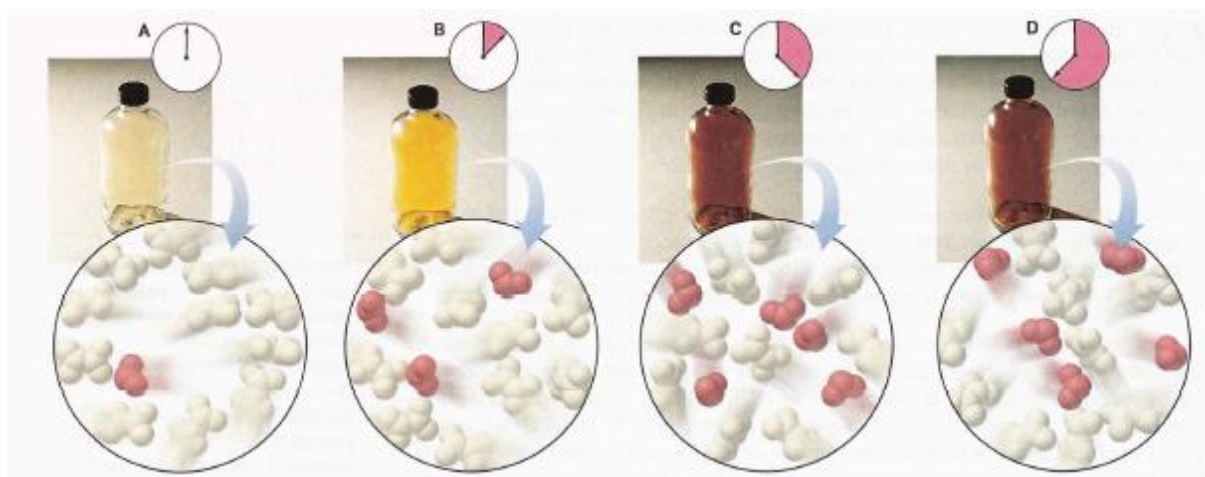
U većini reakcija sudari molekula rezultiraju kemijskom reakcijom samo ako su molekule orijentirane na određeni način. Nije svejedno hoće li se reaktanti sudariti duž osi koja spaja centre molekula ili ne. Na primjer, razmatra se reakcija:



do koje dolazi ako sudar Cl atoma zajedno tvori  $\text{Cl}_2$ , kao što je prikazano na gornjem dijelu slike 19. Suprotno tome, u sudaru prikazanom na donjem dijelu slike 19 dva atoma Cl se ne sudaraju izravno i ne nastaju produkti.

Kemijska ravnoteža je stanje kada se brzina unapredne kemijske reakcije (od reaktanata u produkte) i unazadne reakcije (od produkta u reaktante) izjednače. Kemijska ravnoteža primjer je dinamičke ravnoteže pri kojoj se suprotni submikroskopski procesi i dalje odvijaju, ali se makroskopski gledano ne zapažaju vidljive promjene. Na položaj ravnoteže može se utjecati promjenom vanjskih uvjeta tlaka i temperature. Pri povišenju temperature endotermne reakcije dalje napreduju prema produktima, a pri povišenju tlaka plinskih sustava ravnoteža se pomiče u smjeru nastajanja manjeg broja molekula. Prema Le Chatelierovim načelom promjena koncentracije, tlaka i temperature načini su kojima se 'ravnoteža pomiče' u željenom smjeru.



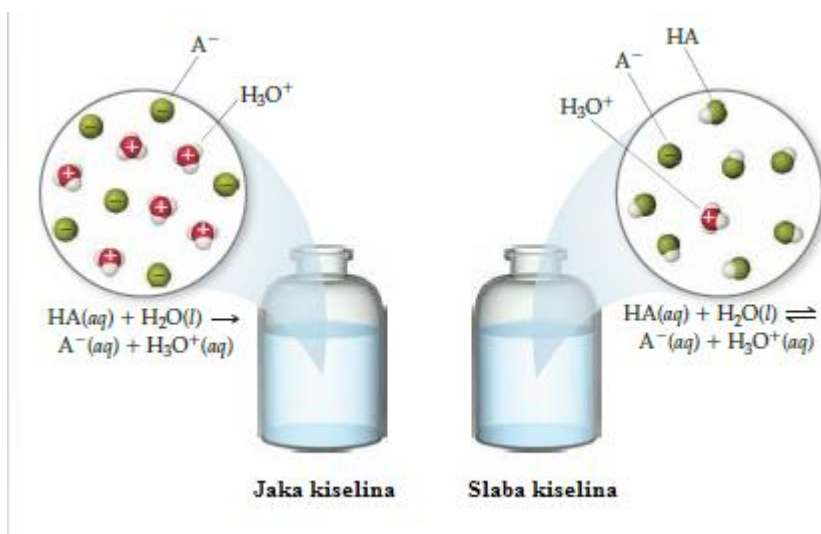


Slika 20. Prikaz postizanje kemijske ravnoteže na makroskopskoj i čestičnoj razini za promjenu  $\text{N}_2\text{O}_4(\text{g}) \rightleftharpoons 2 \text{NO}_2(\text{g})$ , tijekom vremena.<sup>23</sup>

Slika 20 prikazuje promjene u sastavu promatranog zatvorenog sustava tijekom vremena. Molekule  $\text{N}_2\text{O}_4$  nisu obojene, a molekule  $\text{NO}_2$  sustav boje crveno smeđe. U vremenu C dosegnuto je ravnotežno stanje pri određenoj temperaturi i brojnost tvari nadalje ostaje stalna. Ovaj prikaz izdvajam kao najpogodniji od viđenih u udžbenicima kao dobar alat za temeljno usvajanje pojma kemijske ravnoteže. Opisana su mnoga istraživanja u kojima dobiveni rezultati ukazuju da studenti mogu napisati izraz za konstantu ravnoteže i izračunati je iz zadanih podataka ravnotežnih koncentracija sudionika reakcije, ali ne mogu sustav predočiti na atomsko-molekulskoj razini i objasniti zbivanja u njemu.

## 2.5. Otopine soli, kiselina i baza

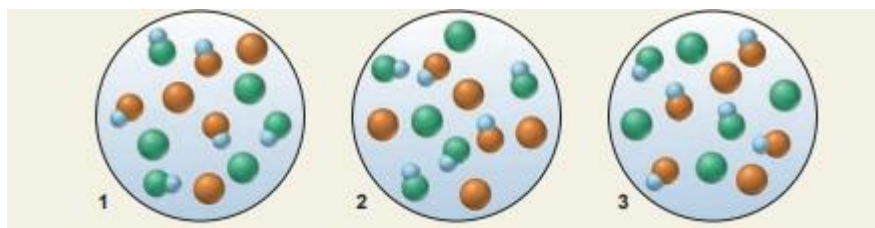
U ovom poglavlju mogućnosti izbora udžbenika koji koriste čestični crtež u pisanom materijalu su brojne. Izbor je pao na obradu samo nekoliko temeljnih pojmova i udžbeničkih prikaza. Poučavanje koncepta kiselosti ili bazičnosti vodenih otopina pogodni su pojmovi za uporabu čestičnog crteža.



Slika 21. Prisutne vrste u otopini jake i slabe kiseline. (preuzeto i prilagođeno prema ref. 24)

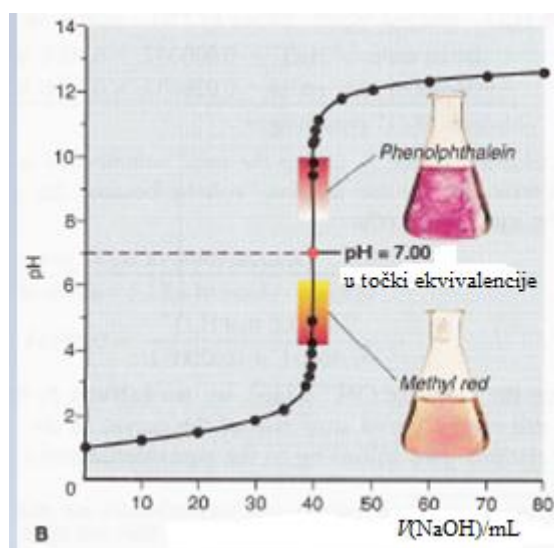
Silberberg u svome poučavanju kiselina i baza donosi jedan zadatak u kojem se želi prikazati čestični prikaz miješanja otopina istih koncentracija, ali različitih pH-vrijednosti.

Ima se  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  otopine X (predstavljena plavom i zelenom bojom na slici 22) koja ima pH-vrijednost od 2,88 i  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  otopine Y (predstavljena plavom i narančastom bojom na slici 22) koja ima pH-vrijednost 3,52.



Slika 22. Kako na čestičnoj razini prepoznati stanje u otopini nastaloj miješanjem dviju otopina kiselina jednakih množinskih koncentracija, a raličitih pH-vrijednosti?<sup>23</sup>

Bronsted-Lowryeva teorija definira kiselinu kao vrstu tvari koja donira proton, a baza je ona koja ga prihvaća. Jača kiselina i baza daje slabu kiselinu i bazu, tako da se moraju odrediti relativne konstante jakosti  $X$  i  $Y$  kako bi se odabrali pravilan čestični crtež. Koncentracije kiselinskih otopina su jednake, tako da jaču kiselinu možemo odrediti izravno preko pH-vrijednosti.  $X$  otopina ima nižu pH-vrijednost ( $\text{pH}=2,88$ ) od otopine  $Y$  ( $\text{pH}=3,52$ ) tako da je  $X$  jača kiselina i  $Y^-$  jača baza. Reakcija  $X + Y^-$  ima  $K_c > 1$ , što znači da će ravnotežna smjesa imati više  $Y$  nego  $X$ . Čestični crtež pod 1) na slici 22. pokazuje da ima jednak broj  $X$  i  $Y$ , što bi se dogodilo da su kiseline jednake jakosti. Čestični crtež pod 2) prikazuje manje  $Y$  nego  $X$ , što bi se dogodilo da je  $Y$  jača kiselina. Stoga možemo zaključiti da je čestični crtež pod 3 u skladu sa rješenjem koje se traži.<sup>23</sup>

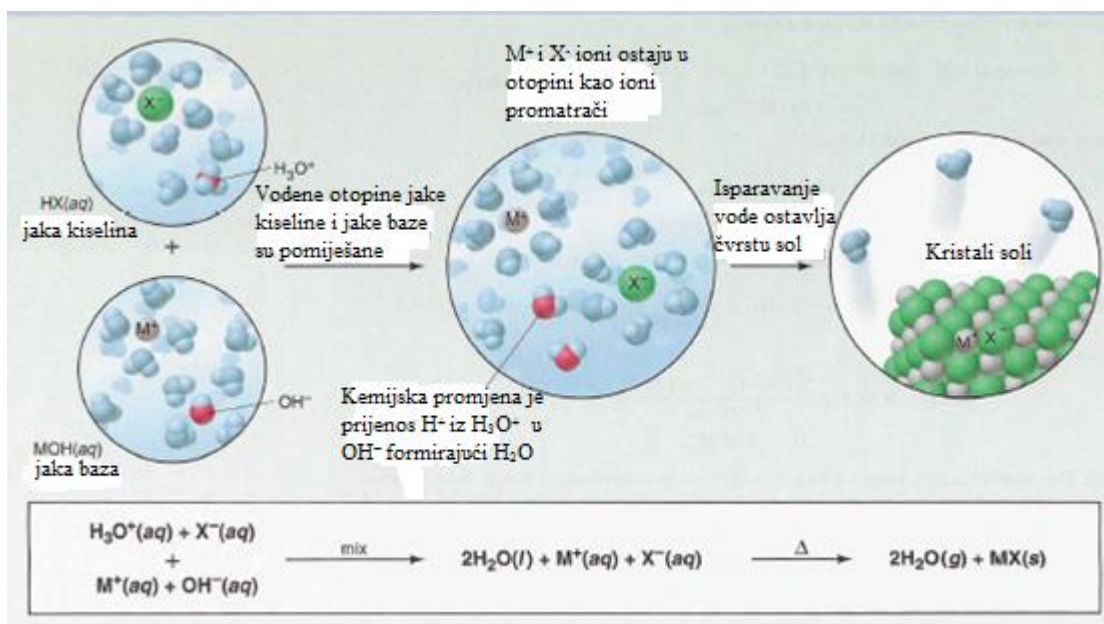


Slika 23. Prikaz titracijske krivulje jake kiseline s jakom bazom. (preuzeto i prilagođeno prema ref. 23)

Prethodna slika prikazuje tipičnu krivulju titracije jake kiseline s jakom bazom. Postoje tri različita područja krivulje:

1. pH počinje nisko, što odražava visoku koncentraciju ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) jake kiseline i povećava se polako jer se kiselina potpuno neutralizira dodavanjem baze.
2. Odjednom, pH strmo raste. Ovaj uspon započinje kada se množine  $\text{OH}^-$  i  $\text{H}_3\text{O}^+$  izjednače. Dodatna kap ili dvije baze neutralizira konačni maleni višak kiseline i uvodi maleni višak baze, pa pH-vrijednost poraste od 6 do 8 jedinica.
3. Iz ovog strmog dijela, pH se polako povećava kako se dodaje više baze.<sup>23</sup>

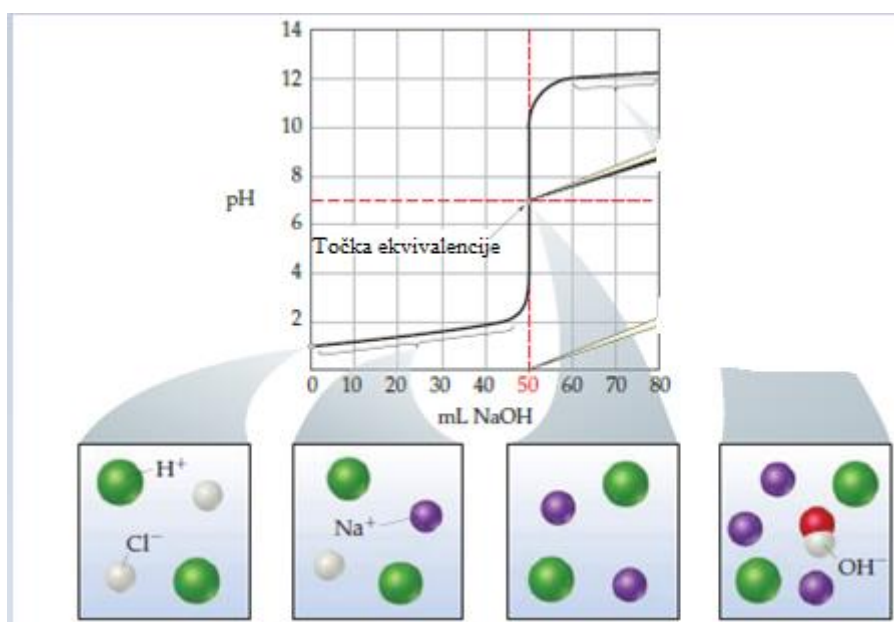
Točka ekvivalencije koja se javlja unutar gotovo okomitog dijela krivulje je točka u kojoj je broj molova dodanog  $\text{OH}^-$  jednak broju molova  $\text{H}_3\text{O}^+$ . Na mjestu ekvivalencije jake kiselinsko-bazne titracije, otopina se sastoji od aniona jake kiseline i kationa jake baze. Krajnja točka titracije nastaje kad indikator promjeni boju. Biramo indikator s krajnjom točkom blizu točke ekvivalencije, onom koja mijenja boju u rasponu pH na strmom okomitom dijelu krivulje. Slika 23. pokazuje promjene za dva pokazatelja koji su prikladni za jaku kiselinsko-baznu titraciju. Metiloranž mijenja boju iz crvene pri pH=4,2 u žutu pri pH=6,3, dok se fenoftalein mijenja od bezbojnog pri pH=8,3 do ružičastog pri pH=10,0.



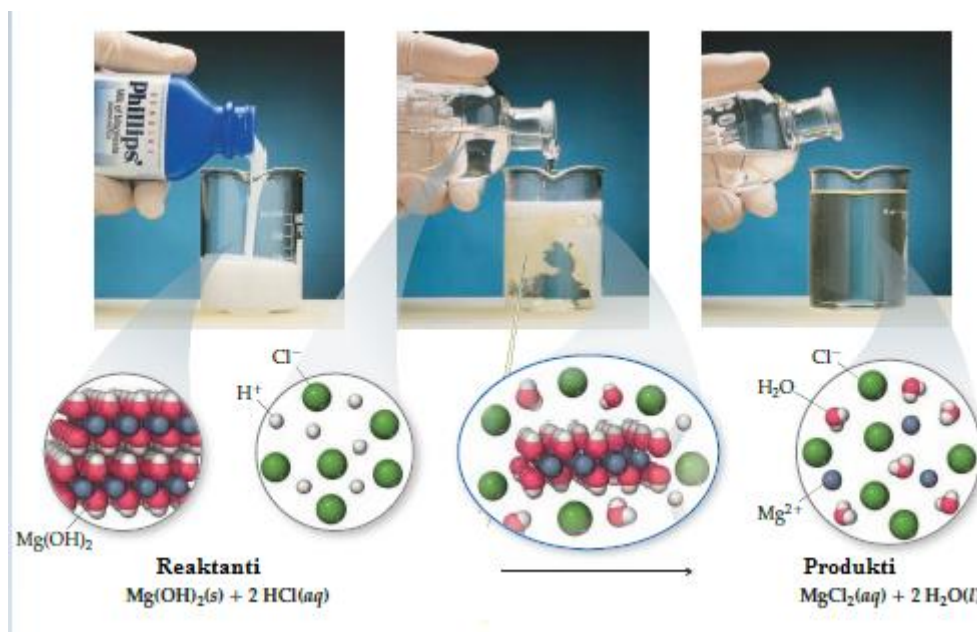
Slika 24. Čestični prikaz titracije jake kiseline s jakom bazom. (preuzeto i prilagođeno prema ref. 23)

Kada pomiješamo otopine jake kiseline (HX) i jake baze (HY),  $\text{H}_3\text{O}^+$  iz kiseline predaje svoj proton  $\text{OH}^-$  baze kako bi se formirala voda. Isparavanjem vode nastaju ioni pomatrači  $\text{X}^-$  i  $\text{M}^+$  kao čvrsti ionski spoj zvan sol (prikazuje slika 24).

Brown, LeMay, Bursten i suradnici daju puno bolji čestični prikaz događanja u neutraliziranoj reakciji jake kiseline i jake baze. U svakom dijelu krivulje moguće je pratiti koja je tvar mjerodavni reaktant ili suvišak. Vidimo kako u prvom dijelu prevladava veća koncentracija  $\text{H}^+$  iona, kasnije postupnim dodavanjem jake baze dolazi do izdjenačavanja  $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-]$ . Dodatkom jedne kapi viška baze dolazi do vidljive promjene boje otopine. Prevladava veća koncentracija  $\text{OH}^-$  iona, otopina postaje bazična.<sup>24</sup>



Slika 25. Prikaz titracijske krivulje jake kiseline s jakom bazom. (preuzeto i prilagođeno prema ref. 24)



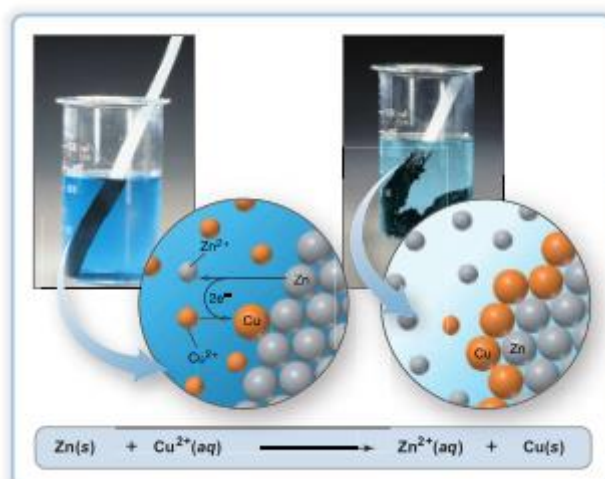
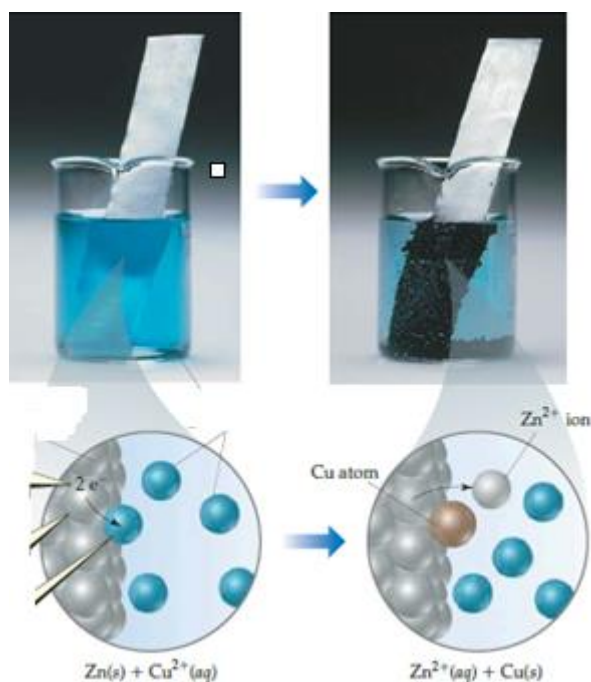
Slika 26. Prikazuje reakciju neutralizacije između klorovodične kiseline i magnezijeva hidroksida. (preuzeto i prilagođeno prema ref. 24)

Magnezijev hidroksid slabo je topljiv u vodi, kada se doda dovoljna količina klorovodične kiseline dolazi do stvaranja vodene otopine koja sadrži ione  $\text{Mg}^{2+}(\text{aq})$  i  $\text{Cl}^{-}(\text{aq})$  ione. Slika 26. primjer je dobre udžbeničke prakse jer objedinjuje sve tri razine (makroskopska, čestična i simbolička) opisane promjene i koristi čestični prikaz.

## 2.6. Redoks reakcije, elektrokemijski članci

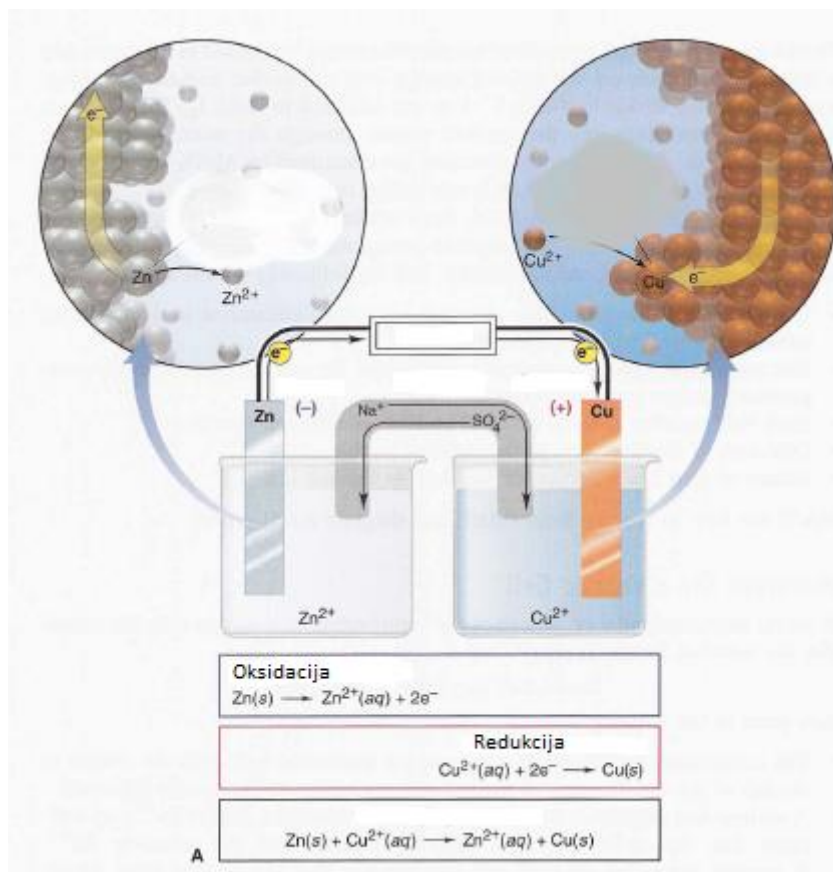
Redoks reakcije su reakcije u kojima se istovremeno zbivaju reakcije oksidacije i redukcije. Tvar koja otpušta elektrone i pritom se oksidira naziva se reducens, jer svojim otpuštenim elektronima istodobno reducira drugu tvar. Obrnuto, tvar koja prima elektrone i pritom se reducira naziva se oksidans, jer istodobno omogućuje oksidaciju tvari od koje prima elektrone. Izbor primjera i čestičnog prikaza redoks reakcija ne razlikuje se puno od udžbenika do udžbenika (slike 27 i 28).



Slika 27. Čestični prikaz redoks reakcije.<sup>23</sup>

Slika 28. Čestični prikaz redoks reakcije. (preuzeto i prilagođeno prema ref. 24)

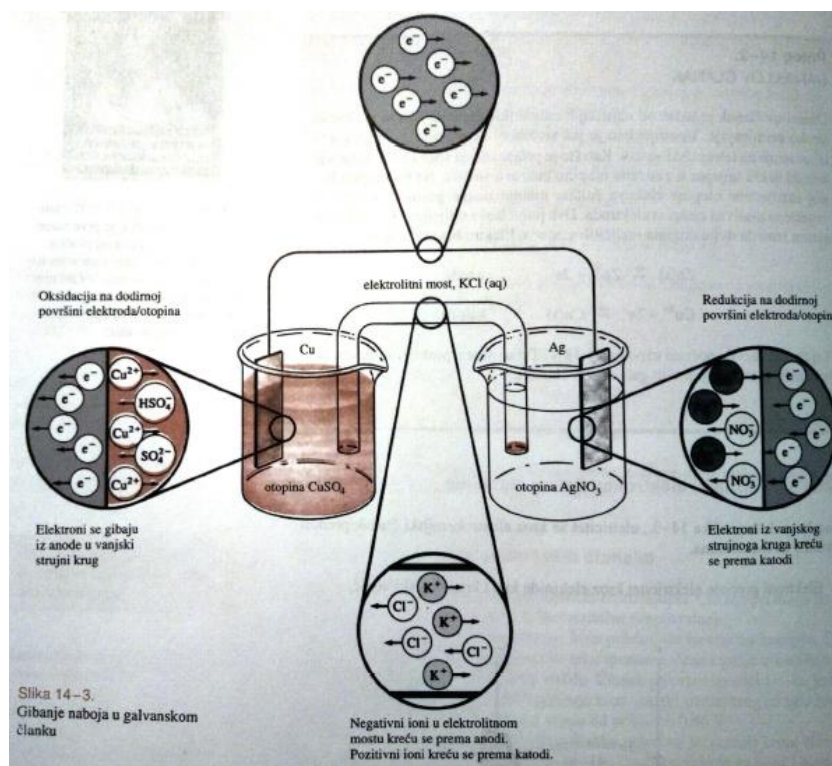
Redoks reakcije su reakcije koje se odvijaju i u galvanskom članku. Daniellov članak je jedan od najstarijih galvanskih članaka koji se široko primjenjuje u praksi (slika 29).



Slika 29. Čestični prikaz Daniellova članka. (preuzeto i prilagođeno prema ref. 23)

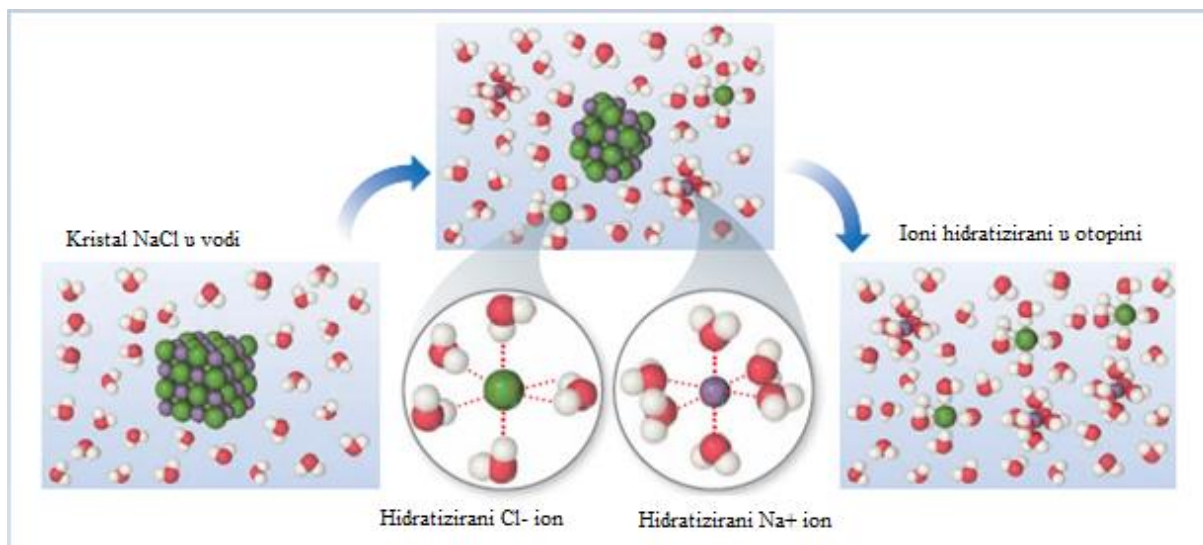
Holler donosi prikaz gibanja naboja u galvanskom članku. Elektricitet se u članku prenosi kretanjem aniona prema anodi i kationa prema katodi. Kao što prikazuje slika 30,  $\text{Cu}^{2+}$  i  $\text{Ag}^{+}$  ioni gibaju se prema srebrnoj katodi, a anioni kao  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^{-}$  i  $\text{HSO}_4^{-}$  putuju prema bakrenoj anodi. Ovaj crtež daje dobar prikaz promjena na čestičnoj razini te gibanja aniona i kationa.<sup>28</sup> Opisano studentsko pogrešno shvaćanje o gibanju elektrona kroz elektrolit može razmatranjem ovog i sličnih prikaza biti ispravljeno, jer je jasno naznačeno da se elektroni prenose kroz vanjski vodič a ne kroz elektrolitnu otopinu.



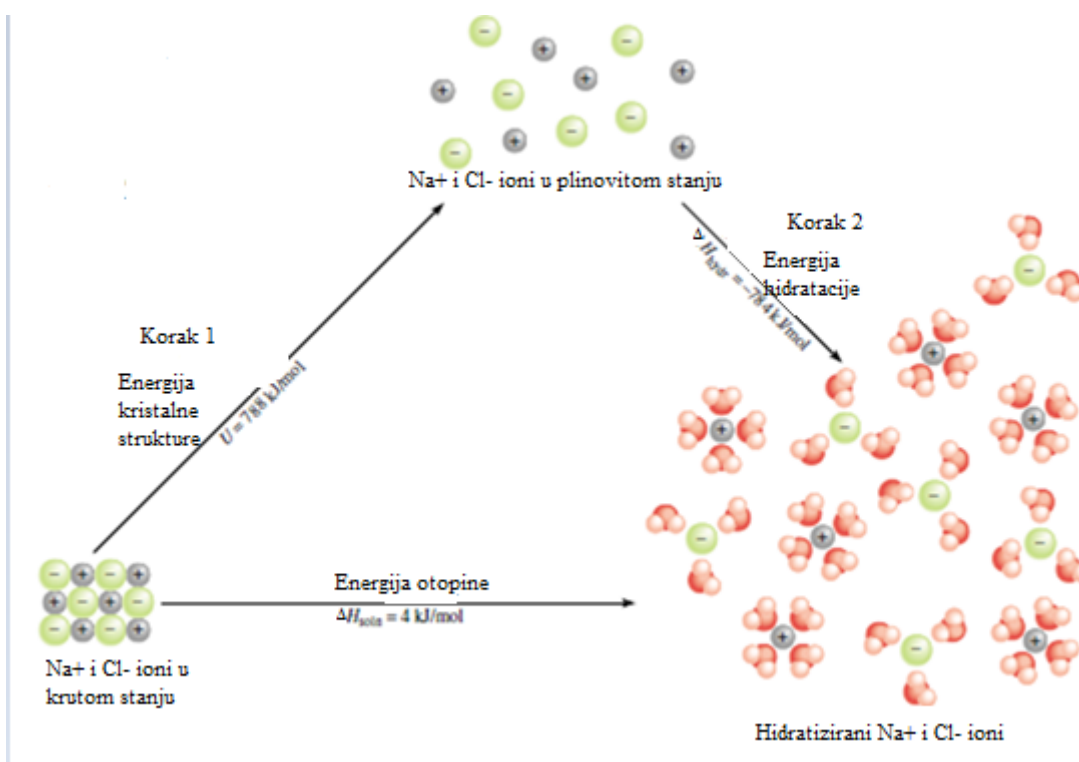
Slika 30. Gibanje naboja u galvanskom članku.<sup>28</sup>

## 2.7. Termokemija

U većini slučajeva otapanjem tvari u otapalu nastaje mjerljiva promjena topline. Pri konstantnom tlaku, promjena topline jednaka je promjeni entalpije. Chang nam daje primjer prikaza 'dogadjaja' kada se čvrsti natrijev klorid otapa u vodi. U čvrstom stanju  $\text{Na}^+$  i  $\text{Cl}^-$  ioni su povezani jakim elektrostatskim silama, ali kada se mali kristal natrijeva klorida otapa u vodi, trodimenzionalna struktura sačinjena od iona raspada se na pojedinačne jedinice.  $\text{Na}^+$  i  $\text{Cl}^-$  ioni u otopini su stabilizirani ion-dipol interakcijom s molekulama vode. U ovom slučaju molekule vode imaju sličnu ulogu kao i dobar električni izolator. Otapanje ionskog spoja kao što je NaCl u vodi uključuje složene interakcije otapala i otopljene tvari. Čestični prikaz je veoma zastupljen u obradi ovih sadržaja, najčešće na primjeru natrijeva klorida (slika 31 i 32).



Slika 31. Čestični prikaz otapanja NaCl u vodi. (preuzeto i prilagođeno prema ref. 24)

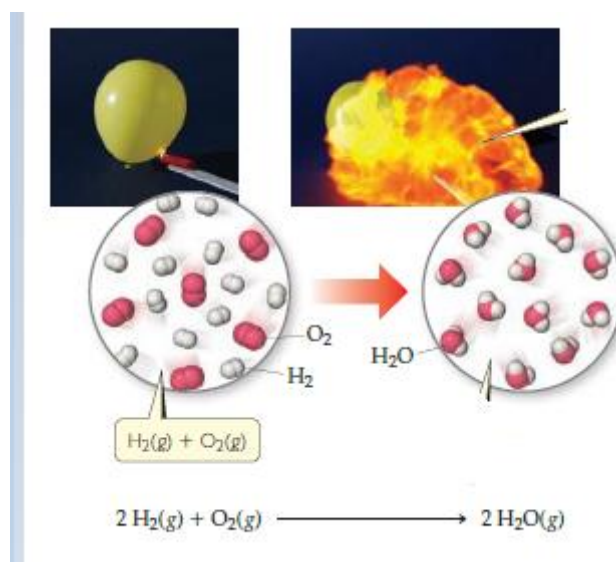
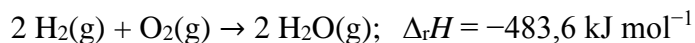


Slika 32. Čestični prikaz promjena pri otapanju natrijeva klorida u vodi uključuje i entalpijski dijagram (preuzeto i prilagođeno prema ref. 27)

Chang nam daje dobar primjer čestičnog prikaza promjena pri otapanju natrijeva klorida u vodi. Može se uočiti razlika raspoređenosti iona u čvrstom, plinovitom i tekućem stanju što

odgovara svim zakonima termodinamike; može se izračunati reakcijska entalpija otapanja jednog mola soli i dr.

Egzotermne i endotermne promjene često su opisane uporabom čestičnog crteža u prikazu koji nerijetko sadrži i simbolički zapis u obliku termokemijske jednadžbe. (slika 33.)



Slika 33. Egzotermna reakcija vodika i kisika (preuzeto i prilagođeno prema ref. 23)

## 2.8. Koligativna svojstva

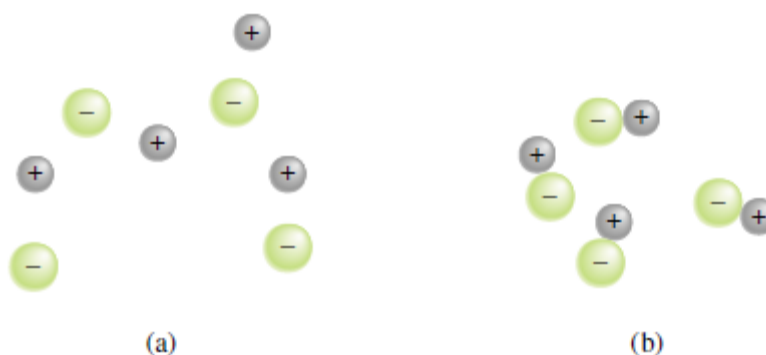
Koligativna svojstva su svojstva otopine koja ovise samo o brojnosti čestica otopljene tvari, a ne o njihovoj vrsti. U koligativna svojstva ubrajamo tlak pare otapala, povišenje vrelišta, sniženje leđišta i osmotski tlak. Koligativna svojstva elektrolita zahtijevaju malo drugačiji pristup od onih koji se koriste za koligativna svojstva neelektrolita. Razlog je u tome što elektroliti disociraju na ione u otopini i tako se odvaja jedna jedinica elektrolita u dvije ili više čestica. Chang daje primjer kako svaka jedinica NaCl disocira na dva iona:  $\text{Na}^+$  i  $\text{Cl}^-$ .<sup>27</sup> Slijedom toga bi koligativna svojstva otopine NaCl množinske koncentracije  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  trebala biti dvostruko veća od otopine neelektrolita jednake množinske koncentracije. Slično tom, očekivano je da vodena otopina  $\text{CaCl}_2$  množinske koncentracije  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  snizi leđišta tri puta više od otopine saharoze jednake koncentracije. Radi objašnjenja ovog učinka mora se primijeniti jednadžba za koligativna svojstva:

$$\Delta T_b = iK_b b$$

$$\Delta T_f = iK_f b$$

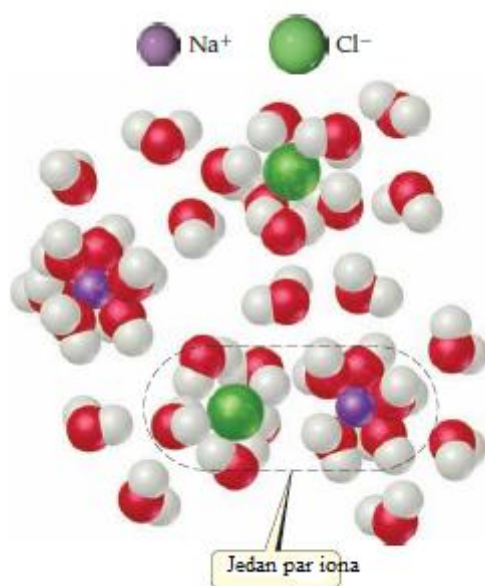
$$\pi = icRT$$

Oznaka  $i$  prikazuje van't Hoff faktor. Odnosno  $i$  bi trebao biti 1 za sve neelektrolite dok za jake elektrolite kao što su NaCl i KNO<sub>3</sub> treba biti 2, a za Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i CaCl<sub>2</sub> treba iznositi 3. U stvarnosti koligativna svojstva otopine elektrolita su obično manja nego što je predviđeno, jer pri višim koncentracijama dolazi do elektrostatskih sila i stvaranja ionskih parova. Ionski parovi se sastoje od jednog ili više kation ili jednog ili više aniona koji se drže zajedno elektrostatskim silama.<sup>26</sup> Stvaranje ionskih parova utječe na promjenu koligativnih svojstava.



Slika 34. Čestični prikaz a) slobodnih iona i b) ionskih parova u otopini<sup>27</sup>

Ioni s većim nabojnim brojem kao što su Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> i PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> imaju veću sposobnost stvaranja ionskih parova nego elektroliti kao vodene otopine NaCl i KNO<sub>3</sub> koji su načinjeni od pojedinačnih nabijenih iona.



Slika 35. Čestični prikaz ionskog sparivanja i koligativnih svojstava. (preuzeto i prilagođeno prema ref. 24)

## 2.9. Čestični crtež, prednosti i nedostaci

Čestični crtež pokazuju određene prednosti i mane u poučavanju kemije. Nyachwaya i dr. otkrili su puno praznina kod studenata u konceptualnom razumijevanju kemije na simboličkoj razini i njihovo razumijevanje na razini čestice.<sup>29</sup> Jedan od razloga zašto je studentima lakše algoritamsko učenje je njihova percepcija prirode kemije kao zbirke činjenica i formula koje jednostavno mogu naučiti napamet. Kod čestičnog prikaza jednadžbi kemijskih reakcije studenti često ne razlikuju jednadžbu kemijske reakcije od reakcijskog sustava, koja može biti posljedica pogrešnog shvaćanja. Kako bi student objasnio kemijsku jednadžbu na čestičnoj razini otkriva se niz poteškoća u shvaćanju čestične građe tvari. Poteškoće su prisutne u razlikovanju naboja iona, ionske i kovalentne veze, geometrije molekula, tumačenju indeksa i stehiometrijskog broja. Prikaz čestičnog crteža zahtijeva povezivanje niza temeljnih kemijskih koncepata.

Nedostatci čestičnog crteža	Prednosti čestičnog crteža
Ne primjećujemo određenu kemijsku vezu bila ona ionska ili kovalentna.	Pomaže u razumijevanju apstraktnih kemijskih pojmova i procesa.
Studenti teško shvaćaju čestični crtež koji prikazuje kemijske promjene koje uključuju ionske vrste.	Njihovom primjenom studenti su stekli bolji uvid u događaje na čestičnoj razini.
Čestični crtež često nije dobro shvaćen zbog nedovoljnog vremena za primjenu čestičnog crteža u nastavi.	Čestični crtež možemo shvatiti kao pokazni oblik koji nam daje sve moguće informacije o određenoj kemijskoj pojavi.
Često nije shvaćen zbog pogrešne uporabe kemijske terminologije.	Čestični crtež je dobar zbog toga što ne traži dodatna materijala sredstva.

## § 3. LITERATURNI IZVORI

1. A. H. Johnstone, *J. Chem. Educ.*, **70** (1993) 701–705.
2. V. Talanquer, *Int. J. Sci. Educ.*, **33** (2011) 179–195.
3. S. Prilliman, *J. Chem. Educ.*, **91** (2014) 1291–1298.
4. S. Šimičić, *Uporaba čestičnog crteža pri analizi, usvajanju, provjeri i unaprjeđenju konceptualnog znanja u početnom poučavanju kemije*, Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Splitu, 2018, str. 14–36
5. G. D. Chittleborough, The role of teaching models and chemical representations in developing students' mental models of chemical phenomena, Doctoral dissertation, Curtin University, Western Australia, 2004.
6. N. Becker, C. Stanford, M. Towns, R. Cole, *Chem. Educ. Res. Prac.*, **16** (2015) 769–785.
7. D. Gabel, *J. Chem. Educ.*, **76** (1999) 548–554.
8. P. G. Nelson, *Chem. Educ. Res. Prac.*, **4** (2003) 19–24.
9. M. B. Nakhleh, *J. Chem. Educ.*, **72** (1993) 52–55.
10. K. Matić, *Alternativni koncepti o temeljnim kemijskim pojmovima- submikroskopska razina*, Metodički dio diplomskog rada, Kemijski odsjek Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Zagreb, 2013.
11. V. Vizek-Vidović, C. Stanford, M. Towns, R. Cole, *Psihologija obrazovanja*, VERN, Zagreb, 2003.
12. M. Bastić, *Primjena trodimenzionalnog modela u procesu stjecanja znanja o konceptu tvari u osnovnoj školi*, Magistarski rad, Sveučilište u Splitu, 2011.
13. R. .R. Skemp, *Mathematics in the primary school*, Taylor & Francis. London, England, 1989.
14. E. L. Smith, C. W. Anderson, *J. Res. Sci. Teaching* **21** (1984) 685–698.
15. G. J. Posner, K. A. Strike, P. W. Hewson, A.W. Gertzog, *Sci. Educ.* **66** (1982) 211–227.
16. P. Johnson-Laird, *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference and consciousness*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1983.
17. R. K. Coll, D. F. Treagust, *Res. in Sci.e & Tech. Educ.*, **20** (2002) 241–267.
18. M. Stains, M. Escriu-Sune, M. L. M. Alvarez de Santizo, H. Sevian, *J. Chem. Educ.* **88** (2011) 1359–1365.
19. M. J. Sanger, C. K. Vaughn, *J. Chem. Educ.*, **90** (2013) 700–709.

20. B. Davidowitz, G. Chittleborough, E. Murray, *Chem. Educ. Res. Prac.*, **11** (2010) 154–164.
21. G. Tsapalis, *Multiple representations in chemical education*, Springer, Berlin, Germany, 2009, 109–136.
22. A. Georgiadou, G. Tsapalis, *Chem. Educ. Res. Prac.*, **1** (2000) 217–226.
23. M. Silberberg, *Chemistry The Molecular Nature of Matter and Change*, McGraw – Hill, 2006, str. 140–144, 148–152, 177–179, 824–830, 909–912.
24. T. L. Brown, H. E. LeMay, B. Bursten, C. Murphy, P. Woodward, M. Stoltzfus, *Chemistry The Central Science*, Pearson, 2015, str. 7–8, 12–13, 60–61, 86–88, 128–138, 179–181, 557–559, 593–596, 744–747.
25. M. Stains, V. Talanquer, *Int. J. Sci. Educ.* **29** (2007) 643–661.
26. R. M. Kelly, J. H. Barrera, S. C. Mohammed, *J. Chem. Educ.* **87** (2010) 113–118.
27. R. Chang, *Chemistry*, McGraw - Hill, New York, 2006, str. 83–86, 219–222, 490–492, 726–730.
28. D. A. Skoog, D. M. West, J. Holler, *Osnove analitičke kemije*, Školska knjiga, Zagreb, 1999, str. 301–302.
29. J. M. Nyachwaya, *College Students' Understanding of the Particulate Nature of Matter Across Reaction Types*, Doktorski rad, The University of Minnesota, 2012, str. 5.